Bifurcation 현상의 수학적 분석을 통한 IPT 보상 회로의 최적설계

이재우, 유승희, 우동균, 이병국†
성균관대학교 정보통신대학

Optimal Design of IPT Compensation Circuits based on Mathematical Analysis of Bifurcation

Jae Woo Lee, Seung Hee Ryu, Dong Gyun Woo, and Byoung Kuk Lee†
College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 자기유도결합 무선전력전송 (IPT) 시스템의 Bifurcation 현상에 대한 분석을 통해, 1, 2차 보상회로 별 Bifurcation 현상 발생 임계점을 도출한다. 도출된 임계점에 해당하는 파라미터를 근거로 400W급 SP 보상회로 IPT 시스템에 대한 PSIM 시뮬레이션을 통하여 분석의 타당성을 검증한다.

1. 서 론

무선전력전송 기술은 전력을 전기적 결합 없이 송수신하는 기술로써, 휴대용 IT 기기 뿐만 아니라 전기자동차 무선 충전 시스템 응용 분야로 확대 전개되고 있다.

그 중 자기 유도 전력 전송이 가장 효과적인 방법으로 활발히 연구되고 있다. 그러나 송, 수신기 결합정도 및 부하의 크기에 따라 Bifurcation 현상이 발생하여 전력전달 능력이 크게 감소하고 제어의 어려움을 가져오게 된다.[1] Bifurcation이란 그림 1과 같이 1차측 코일과 2차측 코일간의 결합계수의 변화로 인하여 입력 임피던스의 공진주파수가 3개로 늘어나는 현상이다.

따라서 본 논문에서는 Bifurcation 현상의 물리적인 정의를 제시하고 IPT 시스템의 SS, SP 토폴로지에서 나타나는 Bifurcation 임계점을 분석하여 1, 2차 측의 코일의 결합계수 k 및 부하의 관계로 정의한다. 이를 MATLAB을 이용하여 도시하고, 400W급 SP 보상회로 IPT 시스템에 대한 PSIM 시뮬레이션을 통하여 Bifurcation 임계점 분석의 타당성을 검증한다.

2. Bifurcation 임계점 분석

Bifurcation 현상이 발생하는 파라미터의 임계점을 분석하기 위하여 자기 유도방식의 무선전력전송 방식 중 그림 2와 같은 SS, SP 토폴로지를 선정하였다.

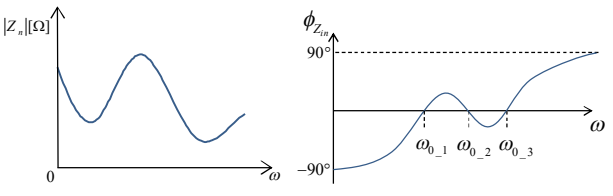


그림 1 입력 임피던스의 Bifurcation 현상
Fig. 1 Bifurcation phenomena in input impedance

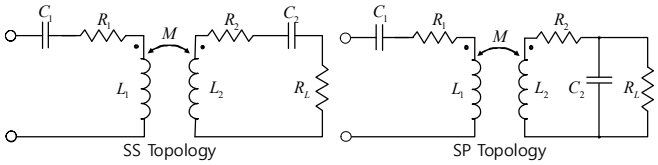


그림 2 SS / SP 보상회로
Fig. 2 SS / SP Compensation Topology

1차측 임피던스와 2차측 임피던스의 리액턴스 성분을 0으로 만들기 위한 C_1, C_2값은 각 토폴로지에 대해 다음 식 (1)~(3)과 같이 정의된다.[2]

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \tag{1}$$

SS 토폴로지 :
$$C_2 = \frac{1}{\omega_0^2 L_2} \tag{2}$$

SP 토폴로지 :
$$C_2 = \frac{1}{2\omega_0^2 L_2}\left(1+\sqrt{1-4\left(\frac{\omega_0 L_2}{R_L}\right)^2}\right) \tag{3}$$

표 1은 SS, SP 토폴로지의 1차측, 2차측, 반사 임피던스의 파라미터에 대한 표현이다

표 1 SS, SP 토폴로지의 임피던스 표현
Table 1 Impedance expression of SS, SP Topologies

	SS	SP
Z_1	$R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1}$	
Z_2	$R_2 + R_L + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2}$	$R_2 + j\omega L_2 + \frac{R_L}{j\omega C_2 R_L + 1}$
Z_r	$\frac{\omega^2 k^2 L_1 L_2}{Z_2}$	

2.1 Bifurcation 임계점

입력 임피던스에서 Bifurcation 현상이 나타나지 않기 위한 조건은 입력 임피던스의 위상이 공진주파수 이상의 주파수에서 항상 0 이상을 만족하는 것이다.

이는 1차측 임피던스의 리액턴스 성분과 1차측에 투영된 2차측의 반사 임피던스의 리액턴스 성분의 합이 항상 0 이상이

어야 함을 의미하며, 그에 따른 Bifurcation 임계점을 나타내기 위한 조건은 식 (4)와 같다.

$$|Im[Z_1]| \geq |Im[Z_r]| \tag{4}$$

표 1과 식 (1)~(4)로부터 도출한 각 토폴로지에 대한 Bifurcation 임계 결합계수 k는 Q_2, ω_n, R_n의 함수이며 식 (5), (6)과 같다.

$$k_{SS} \leq \sqrt{\left(\frac{1}{\omega_n Q_2}\right)^2\left(1+\frac{1}{R_n}\right)^2+\left(1-\frac{1}{\omega_n}\right)^2} \tag{5}$$

$$k_{SP} \leq \sqrt{\left(1-\frac{1}{\omega_n^2}\right)\times\left[1+\frac{\frac{\omega_n^2}{2}\left(\frac{1}{Q_2^2}-1\right)\times\left\{1+\sqrt{1-4(Q_2R_n)^2}\right\}-\omega_n^2R_n^2+(R_n+1)^2}{\frac{1}{2}(\omega_n^4-\omega_n^2)\times\left(-2(Q_2R_n)^2+\left\{1+\sqrt{1-4(Q_2R_n)^2}\right\}\right)}\right]} \tag{6}$$

Q_2, ω_n, R_n은 식 (7)과 같다.

$$Q_2=\frac{\omega_0 L_2}{R_2},\ \omega_n=\frac{\omega}{\omega_0},\ R_n=\frac{R_2}{R_L} \tag{7}$$

2.2 Bifurcation 시뮬레이션

Q_2=380에서 SS 및 SP 토폴로지의 Bifurcation 임계 결합계수 추이를 MATLAB으로 그림 4, 5와 같이 나타내었다. 출력전력이 400W인 SP 보상회로 IPT 시스템에 R_n=0.001을 적용하였을 때의 Bifurcation 현상은 그림 6과 같다. 그림 6 (b)는 k값이 임계값보다 큰 경우 Bifurcation 현상이 발생하여 입력전류의 위상이 입력전압의 위상보다 앞서는 것을 보여준다.

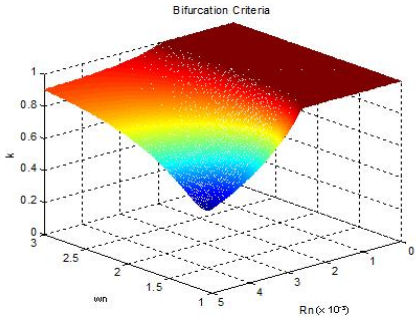


그림 4 SS 토폴로지의 Bifurcation 임계점
Fig. 4 Bifurcation criteria in SS topology

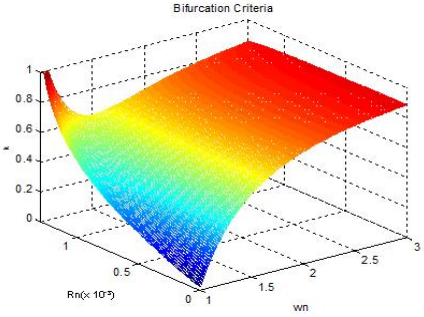
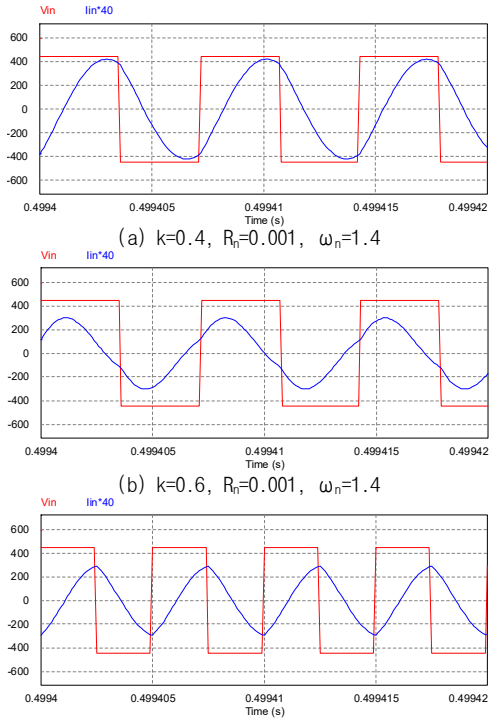


그림 5 SP 토폴로지의 Bifurcation 임계점
Fig. 5 Bifurcation criteria in SP topology



(a) k=0.4, R_n=0.001, ω_n=1.4

(b) k=0.6, R_n=0.001, ω_n=1.4

(c) k=0.6, R_n=0.001, ω_n=2

그림 6 파라미터 변화에 따른 SP 토폴로지의 Bifurcation 현상
Fig. 6 Bifurcation phenomena of parameter variation in SP topology

그림 6 (c)는 그림 6 (b)의 조건에서 스위칭 주파수의 크기를 늘렸을 때, 임계 결합계수 k가 Bifurcation 안정영역에 위치하여 입력전압의 위상이 입력전류의 위상보다 앞서는 것을 보여준다.

3. 결 론

본 논문에서는 SS 및 SP 토폴로지의 Bifurcation 현상 의 임계 결합계수 값을 주파수, 인덕턴스, 저항에 관한 수식으로 도출하였다. SS 토폴로지의 Bifurcation 임계값은 부하 저항이 커짐에 따라 증가하며, SP 토폴로지의 경우 부하저항이 커짐에 따라 임계값이 감소함을 나타냈다. 400W급 SP 보상회로 IPT 시스템에 도출된 결과를 적용하여 임계 결합계수를 넘으면 Bifurcation 현상이 발생함을 확인하여 수식의 타당성을 검증하였다. 실제로는 인덕턴스의 크기에 따라 인덕터의 기생저항 크기가 결정이 되므로 부하저항의 크기의 변동으로 R_n을 조정하는 것을 설계에 반영해야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] Chwei Sen Wang, Grant A. Covic, Oskar H. Stielau, "Power Transfer Capability and Bifurcation Phenomena of Loosely Coupled Inductive Power Transfer Systems", IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL. 51, NO.1, February, 2004.

[2] R. Bosshard, U. Badstübner, J. W. Kolar, I. Stevanovic, "Comparative Evaluation of Control Methods for Inductive Power Transfer", Proceedings of the ICRERA 2012, November, 2012.